

サンゴ礁海域の水環境に関する陸水・外洋水影響の検討

灘岡和夫* ・二瓶泰雄**・横堀達也***
熊野良子****・大見謝辰男*****

1. はじめに

サンゴ礁に隣接する陸域での農地造成等の様々な開発行為は、それによって表層土壌（赤土）や栄養塩等がサンゴ礁海域に過剰に流入・拡散することにより、サンゴそのものひいてはサンゴ礁生態系全体に多大な影響を及ぼすものと考えられる。また、ごく最近では、外洋からの高温水塊の影響と見られるサンゴの白化現象が、南西諸島をはじめ世界各地のサンゴ礁海域で報告されている。高温化の要因としては、1997年に大規模に発生したエルニーニョ現象の影響や、1998年夏季に南西諸島での台風の通過個数が例年と比べて極端に少なかったこととの関連性が指摘されている。このように、サンゴ礁内における水環境や生態系は、陸水や外洋水の影響を顕著に受けていることから、これらの挙動を含めた形でサンゴ礁海域の水理現象を把握していくことが必要不可欠である。

これまで、サンゴ礁海域における現地観測としては、主としてリーフ内外における波・流れ場を対象として行われている（例えば、谷本ら, 1988; 仲座ら, 1992; (財) 沖縄県環境科学センター, 1995; Yamano ら, 1998)。またリーフ内での赤土拡散・堆積過程やそれがサンゴ礁環境に及ぼす影響などに関しても精力的に検討が行われている（例えば、津嘉山ら, 1992; 大見謝, 1996）。このようにいくつかの現地観測は行われているものの、サンゴ礁海域内における河川水や外洋水の挙動は、波、風、潮流、地形効果による影響を顕著に受けることから、現象的に非常に複雑で、十分明らかになっているとは言いがたい。特に、台風などの気象イベント時におけるサンゴ礁海域内での河川水・外洋水の基本特性に関する知見は皆無である。

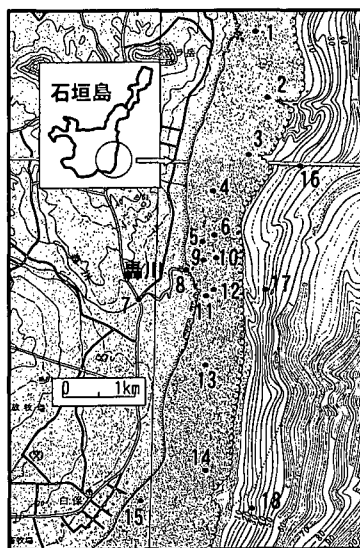


図-1 観測海域の概要
(図中の番号は観測位置を表している)

そこで本研究では、サンゴ礁環境に多大な影響を及ぼす陸域起源の影響と外洋水塊の影響の双方を具体的に明らかにするために、それらの影響を受けている海域の一つの典型例である沖縄県石垣島の白保海域において現地観測を行い、その結果を基に、サンゴ礁海域での水理現象を解明することを試みた。ここでは、観測期間中極めて特徴的な挙動を示した台風時のデータ解析結果を中心に述べるが、それらの結果の詳細や台風時以外の観測結果に関しては、灘岡ら（1999）を参照されたい。

2. 現地観測の概要

現地観測は、アオサンゴの大群落で世界的に有名な沖縄県石垣島南東部に位置する白保サンゴ礁海域において、1998年10月7日～11月8日までの約1ヶ月間実施した。このサンゴ礁海域における河川及び外洋影響を明らかにするために、図-1のように陸域(孟川)2カ所、リーフ内13カ所、リーフ外3カ所ので合計18ヶ所の観測点を配置した。観測では、これらのほぼ全ての観測点において水温、塩分を、河川内及び河口の前面において濁度、

* フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所
情報環境学専攻
** 正 会 員 博(工) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究所
情報環境学専攻
*** 正 会 員 修(工) 東京都下水道局北部第二管理事務所施設課
**** 学生会員 東京工業大学大学院情報理工学研究所情報環境学専攻
***** 沖縄県衛生環境研究所 環境生活部赤土研究室長

クロロフィル a 濃度を計測し、また、リーフ内、外の数ヶ所において流速 (Sta. 16, 17 では ADCP, 他は底面流速のみ)、波高、波向、水位変動を測定した。このようなごく浅い海域においても、河川水は数十 cm 程度のごく薄い層をなしてリーフ内を流出することが予備観測より確認されたので、この挙動を十分に捉えるために、各測定点で、係留ブイに表層付近で密になる間隔で水温、塩分計を数本取り付け、さらに表層付近に濁度、Chl. a 濃度計を設置した。なお、観測期間中には、10月16日前後に台風10号が接近し、暴風及び高波に見舞われた。

3. 観測期間中における気象・海象の概況

図-2は、全観測期間における風速ベクトル、Sta. 9 (リーフ内、平均水深約 0.8 m)、及び Sta. 17 (リーフ外、平均水深 28.5 m) における流速ベクトル、そして Sta. 8 (河口、平均水深約 0.4 m)、Sta. 9、Sta. 17 における鉛直平均水温の時系列データを示している。ここでの風速ベクトルは石垣島地方気象台における実測値を用いている。風速ベクトルを見ると、平常時には約 5 m/s の季節風である北東風が卓越しているが、10月15~17日にかけて接近した台風10号により、15 m/s 以上の強風が時計回りに風向を変化させながら吹いていた (図中ハッチ部分)。そのとき、Sta. 17 では、最大で 6 m を越す有義波高が観測された。

リーフ内の Sta. 9 の流速ベクトルを見てみると、台風時には、20 cm/s を越える北上流が継続していたが、5 m/s 以下の風速となる平常時では、その風向と流向の相関が低下している。一方、リーフ外の Sta. 17 に関しては、概ね振幅 10~20 cm/s 程度の半日周期成分の流速変動が卓越していることが分かる。次に河口 (Sta. 8)、リーフ内 (Sta. 9) 及びリーフ外 (Sta. 17) における水温変動に着目すると、まず、陸水の影響を顕著に受けている Sta. 8 では、その他の場所と比べて水温は常に低く、陸水はリーフ外側や内側と比べて低温であることが分かる。それに対して、Sta. 17 では、台風以外の時期には明確な変動を示していないが、台風時では約 1 日の間に水温が約 3°C 低下した後約 2°C 上昇し、台風通過前後で約 1°C の水温低下が生じていることが分かる。一方、Sta. 9 では、台風時には、リーフ外と類似した水温低下・上昇パターンが見られるものの、その変動振幅はリーフ外よりも大きく、しかも、台風後数日にわたってリーフ外よりも低温になっていることが分かる。また、平常時には、リーフ外とは異なり、日周期の水温変動成分が卓越していることが分かる。これは、リーフ内水深が 1~2 m と極めて浅いことから、大気側からの熱輸送の影響が顕著に出たものと考えられる。

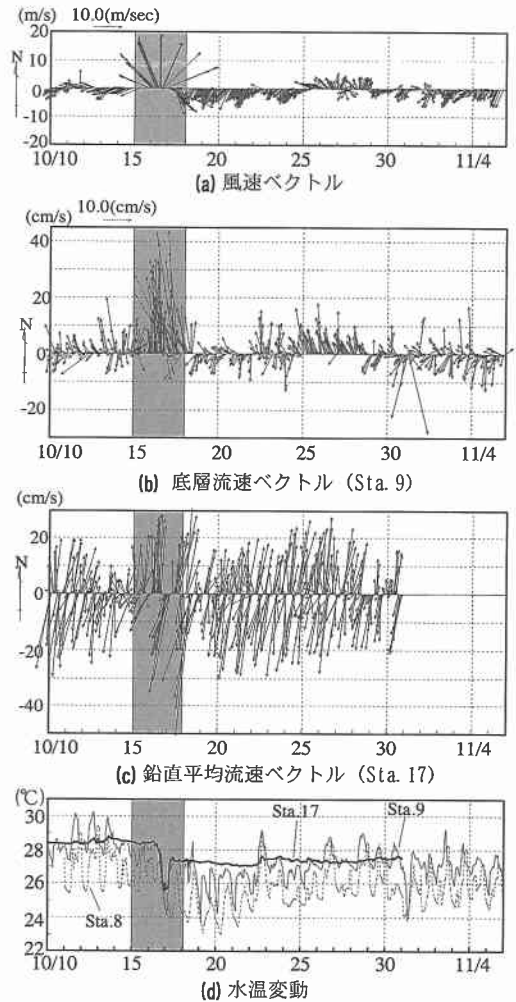


図-2 観測期間中の気象・海象データの概況

4. 台風時におけるリーフ内外の物理・熱環境

(1) 水温急変現象の成因

台風時 (10月15日~17日) におけるリーフ外 (Sta. 17) とリーフ内 2 点 (Sta. 9 及び Sta. 15) における鉛直平均水温データの時系列変化を図-3 に示す。これを見ると、図-2 に示したように、リーフ内の 2 点では、リーフ外における水温低下及び上昇パターンと類似した挙動を示すものの、そこでの水温の最低値のみならず、低下・上昇を開始するタイミングが大きく異なっていることが分かる。さらに、リーフ内の 2 点間で比較しても、それらの水温変動特性はかなり異なっている。

このような水温急変現象の成因を明らかにするために、この 3 地点において熱収支解析を行うことを試みた。単位水表面積の全水深にわたる水柱を対象とすると、熱収支関係は、各検査面における熱フラックスの総和が水

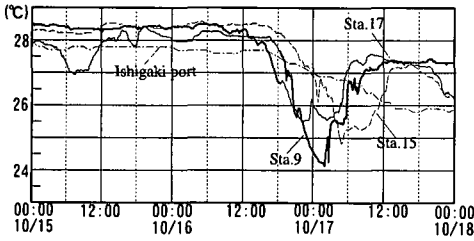
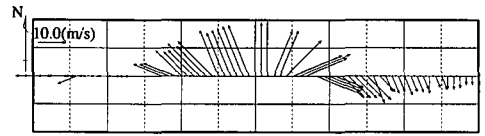
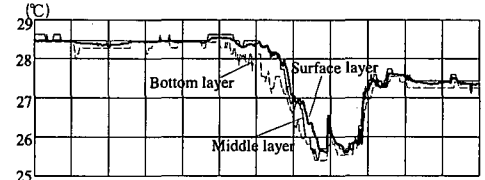


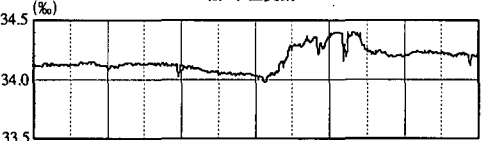
図-3 リーフ内, 外, 石垣港における水温変動特性



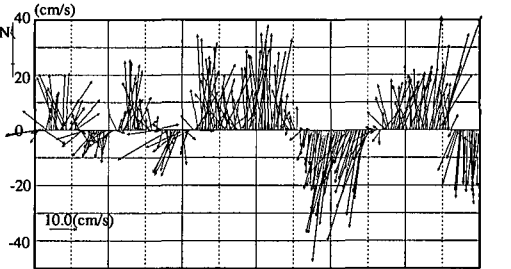
(a) 風速ベクトル



(b) 水温変動

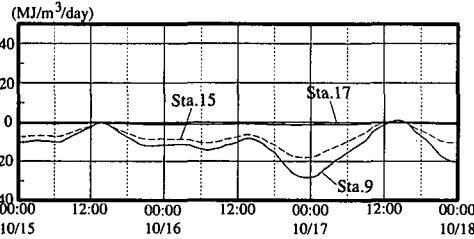


(c) 表層塩分変動

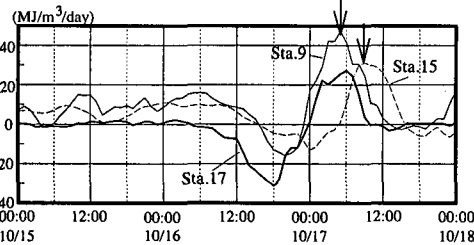


(d) 鉛直平均流速ベクトル

図-5 水温急変時におけるリーフ外挙動 (Sta. 17)



(a) 大気からの熱輸送成分 G



(b) 水平熱輸送成分 ΔF

図-4 熱収支解析結果

柱内における温度増減効果を表す単位時間当たりの貯熱変化量と等しくなる形で表現できる。ここでの各検査面での熱フラックスを、海表面及び海底面上での熱フラックス G , G_{soil} , そして水平移流・拡散 (以下, 単に「水平移流」と呼ぶ) 熱フラックス差 ΔF , とすると以下のような式が与えられる。

$$\dot{S} = G + G_{\text{soil}} + \Delta F \dots \dots \dots (1)$$

ここでの各フラックスの符号は、水柱の温度を上昇させる向きを正としている。式 (1) 中の各フラックスの算出としては、貯熱変化量 \dot{S} , 大気側からの熱フラックス G , 水平移流フラックス差 ΔF に関しては、内山ら (1998) と同様の方法で行った。残りの G_{soil} に関しては、地下水に伴う移流効果を考慮せず、熱伝導のみにより決定されると仮定して、海底面温度を境界条件として熱伝導方程式より得られる解析解から与えることとした。その詳細は灘岡ら (1999) を参照されたい。

以上のように算出された各熱フラックスのうち、主として卓越していた大気側からの熱フラックス G と水平移流による熱輸送分 ΔF を 6 時間移動平均した形で図-4

に示す。ここでは、水柱への熱輸送量を水温変化量に変換した形で把握するために、各フラックスを各測定点での水深で除した形で表示している。これらを見ると、まず、リーフ外 (Sta. 17) では、大気の影響はごく小さく、水平移流が卓越して大きく変動していることが分かる。それに対して、リーフ内の 2 地点では、水深が非常に浅いことから大気の影響を強く受け、それと同時に水平移流による熱輸送も顕著になっている。さらに、この水平移流成分は、リーフ内において、複雑な地形効果により、そのピーク位置 (図中矢印) が互いに大きくずれていることが分かる。このような特徴的な挙動を示した水平移流による熱輸送分とリーフ内外の水理現象との関連性について次節で検討する。

(2) 水温変動過程とリーフ内外の水理現象の関係

a) リーフ外の場合

まず、リーフ外の水温の急激な低下およびその後の上昇現象を引き起こした水平移流成分の物理過程に関して検討する。図-5 は、台風時における風速ベクトル、Sta. 17 における水温、表層塩分、および ADCP により観測された鉛直平均流速ベクトルを示す。表層塩分濃度と水温変動の関係に着目すると、水温のなだらかな低下に対応

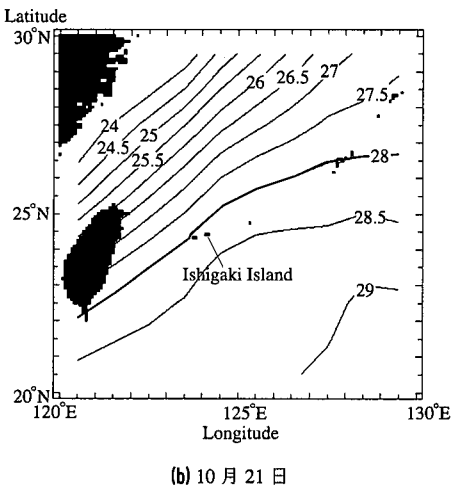
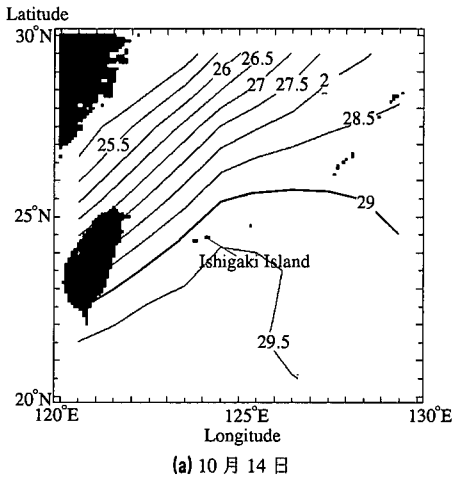


図-6 広域表面水温分布 (NOAA 画像)

して塩分濃度が上昇し、また、水温の急上昇とともに塩分濃度が急激に低下している様子が見られる。このような水温・塩分濃度変動と流速ベクトルの対応について見てみると、水温低下・塩分上昇期においては北上流が、水温上昇・塩分低下期には南下流がそれぞれ卓越しており、それぞれ、沿岸湧昇、沈降モードと対応していることが分かる。すなわち、沿岸湧昇現象に伴って、底層から低温で高塩分水塊が上昇し、その後、沿岸沈降現象により沖合表層付近の相対的に高温で低塩分水塊が岸近くまで輸送されてきたものと考えられる。以上のことから、図-4 に示されているようなリーフ外における水平移流による熱輸送成分の時間変動は、沿岸湧昇、沈降現象と明確に対応していることが分かる。なお、図-3 に示されている石垣島南部に位置する石垣港の水温データを見れば明らかなように、そこでの水温は台風時に低下しているものの、かなり緩やかに変化しており、しかもその後の水温上昇過程は見られない。したがって、上述した沿

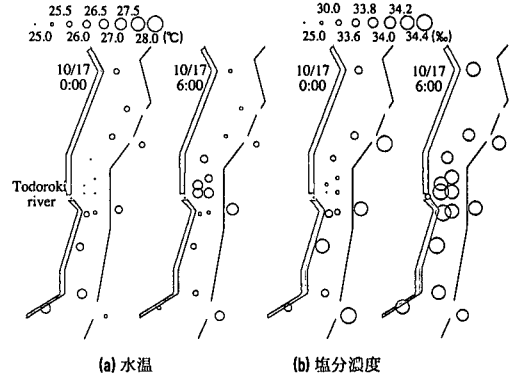


図-7 リーフ内における河川水・外洋水挙動

岸湧昇・沈降現象が島東岸で発生した局所的な動的変動過程であるものと思われるが、その詳細に関しては、今後数値計算等により検討していく必要がある。

このような沿岸湧昇・沈降現象により水温や塩分濃度は動的に大きく変動するものの、台風前後の静的な平衡状態を比較すると、水温は約1°C低下し、塩分濃度は約0.1~0.2‰上昇している。この台風前後に本観測海域近くでSTD観測を実施した黒山ら(1999)は、台風前では約70m程度であった表層混合層厚さが、台風後には約120m程度まで増大したことを示しており、強風に伴う鉛直混合作用が水温低下や塩分上昇に大きく寄与したのと考えられる(ただし、表層水温の低下には、台風時の大気側からの冷却効果もある程度寄与しているのと考えられる)。また、水温低下現象がどの程度の水平スケールで発生したかを検討するために、東シナ海一帯を含んだNOAA画像に基づく台風前後の表面水温分布を図-6に示す。これを見ると、台風前には石垣島北側に29°Cの等値線が位置していたが、台風後にはほぼ同様な位置に28°Cの等値線があり、台風前後でほぼ全域において約1°Cの水温低下が生じている。このことから、上記の水温低下現象は、かなり広域で発生した現象であることが確認できる。

b) リーフ内の場合

次に、台風時におけるリーフ内での河川水及び外洋水の水平移流過程を明らかにすることを試みる。図-7は、10/17の0時(干潮時)及び6時(満潮時)における水温、塩分の平面分布を示す。図中の水温・塩分値は丸の大きさにより数種類に分類されている。これを見ると、干潮時には、低水温、低塩分を示す領域が河口前面域に見られ、その影響が北側に伝わっている。これは、降雨に伴い出水した河川水が、リーフ内の強い北上流により北側へ移動したのと考えられる。次に、満潮時には、リーフ内全域にわたって塩分濃度が上昇しており、外洋水がリーフ内に侵入している。しかしながら、水温に関して

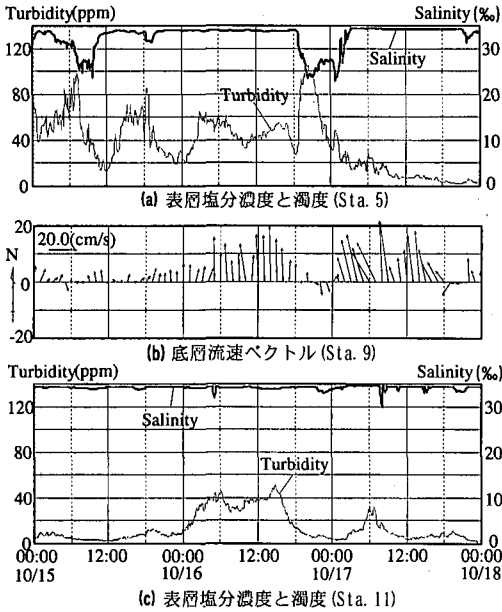


図-8 濁度変動特性

は河口前面域が相対的に高いことなど、顕著な非一様性が存在しており、外洋水の影響の受け方がリーフ内において場所的に大きく異なっていることが分かる。

(3) 濁度変動特性

次に、台風時における濁水の挙動を把握するために、Sta. 5 (河口前面北側) と Sta. 11 (河口前面南側) における表層濁度・塩分, Sta. 9 における底層流速ベクトルの時系列データを図-8 に示す。これらを見ると、濁度は、塩分低下と連動して増加するとき、無関係なときが存在している。特に、Sta. 11 ではほとんど塩分低下は見られず河川水が到達していないものと思われるにも関わらず、高レベルの濁度が現れていることが分かる。このようなときには、Sta. 9 の底層流速値が 20 cm/s 以上となっていることから、海底面に堆積していた赤土を含む土砂が再浮上し、それが輸送されているものと考えられる。このように、台風時には、底面に堆積していた赤土が強風下で形成された強い流れに伴って pick-up されることから、台風が“底質の除去効果”を有していることが分かる。

5. おわりに

本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

1) 台風時においては、リーフ外では、水温が一日の間に 3°C 低下、その後 2°C 上昇し、台風前後で約 1°C の水温低下が見られた。このような低下現象はかなり広域にわたる現象であったことが NOAA 画像より確認され

た。また、リーフ内では、台風時にリーフ外よりも低温になり、台風後、低温傾向が長く続く現象が見られた。

2) このような水温データに対する熱収支解析を行った結果、リーフ外では沿岸湧昇・沈降現象に対応した水平移流による熱輸送が卓越していたこと、リーフ内では水平移流成分に加えて、大気からの熱輸送の寄与分も顕著になっていたこと、また、その水平移流成分に関しては、リーフ内において、その変動ピーク位置が地形効果によって大きく異なっており、外洋水の影響の受け方が場所によって変化していること、などが明らかになった。

謝辞：本観測では、数多くの様々な観測機器を用いたが、それらの一部は、東京大学大学院理学系研究科地理学専攻茅根教授、(株)協和商工、(株)アレック電子、水産工学研究所中山哲敏氏、東京工業大学土木工学科池田駿介教授からお借りしたものである。また、東大茅根教授からは気象データも提供して頂いた。さらに、運輸省港湾技術研究所内山雄介氏からは観測方法に関する丁寧な御助言を頂き、石垣島リゾート専門学校と白保漁協の方々には、現地観測実施の際に多大なるご助力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(1)(課題番号:10450181, 代表者:灘岡和夫)、国際学術研究(課題番号:09044144, 代表者:灘岡和夫)によるものである。

参 考 文 献

内山雄介・灘岡和夫・瀬崎智之・八木 宏 (1998): 東京湾奥極浅海域の砂浜海岸周辺における成層期の水環境特性, 土木学会論文集, No. 533/II-43, pp. 125-144.
 大見謝辰男 (1996): 赤土堆積がサンゴに及ぼす影響, 沖縄県衛生環境研究所報, Vol. 30, pp. 79-86.
 黒山順二・中島敏光・豊田孝義・筒井浩之・吉澤拓也 (1999): 沖縄石西礁湖におけるサンゴ礁環境の実態と台風の影響, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, p. 89.
 (財)沖縄県環境科学センター (1996): サンゴ礁生態系保全調査報告書.
 谷本修志・中野泰雄・大月和義・宇多高明・小俣 篤 (1988): 沖縄県仲泊地区のリーフ周辺での波と流れの観測, 海岸工学論文集, Vol. 35, pp. 207-211.
 津嘉山正光・仲座栄三・高良尚樹・屋良朝博 (1992): 赤土流出の発生とサンゴ礁水域内での拡散について, 海岸工学論文集, Vol. 39, No. 2, pp. 945-949.
 仲座栄三・津嘉山正光・砂川恵輝 (1992): 強い海浜流の発生海域における潮流・波・サーフビート, 海岸工学論文集, Vol. 39, No. 1, pp. 241-245.
 灘岡和夫・二瓶泰雄・横堀達也・熊野良子・大見謝辰男 (1999): 陸域・外洋影響を考慮したサンゴ礁海域における水理現象の解明, サンゴ礁学会誌 (投稿予定).
 Yamano, H., H. Kayane, N. Yonekura, H. Nakamura and K. Kudo (1998): Water circulation in a fringing reef located in a monsoon area: Kabira Reef, Ishigaki Island, Southwest Japan, Coral Reefs, Vol. 17, pp. 89-99.